基于地下水动态和经验模型的巴丹吉林沙漠潜水蒸发量级
——以苏木吉林湖区为例

张文佳， 王乃昂， 于昕冉， 牛震敏， 赵力强
（兰州大学资源环境学院，冰川与沙漠研究中心，甘肃 兰州 730000）

摘 要：为确定巴丹吉林沙漠腹地湖区潜水蒸发对地下水排泄的贡献量级，以沙漠腹地的苏木吉林湖区为研究区，使用高分辨率影像、DEM和实测的地下水埋深提取了研究区湖泊水面、不同类型植被区及不同地下水埋深区的范围，基于地下水动态信息法和潜水蒸发经验模型分别计算了植被覆盖区和裸地的潜水蒸发量。结果表明：(1)同时期内芦苇观测点潜水蒸发量大于芨芨草-白刺观测点，且两者分别在生长中期、前期达到峰值。(2)同等大气蒸发条件下，苏木吉林湖区有植被覆盖的潜水蒸发总量比无植被覆盖条件下多16%～18%，仅使用裸地潜水蒸发经验模型计算会产生较大误差。(3)苏木吉林湖区潜水蒸发总量占湖区地下水排泄总量的11.3%～13.2%，证明潜水蒸发是巴丹吉林沙漠湖区水量平衡研究中不可忽略的关键因素之一。

关键词：潜水蒸发；蒸发临界深度；滨湖植被；地下水动态信息法；地下水排泄；巴丹吉林沙漠

在干旱区，潜水蒸发是地下水排泄的重要方式之一，包括表土蒸发和植被蒸腾。近年来，为合理利用地下水资源，潜水蒸发成为研究热点，潜水蒸发估算的方法不断被提出与改进[1]，其中，经验模型由于结构简单，且由实测资料得来而被广泛采用[2-3]，多用于裸地潜水蒸发计算。目前，有一种基于地下水水位观测估算植被覆盖区潜水蒸发量的方法，最初由White[4]提出，称之为地下水动态信息法。该方法在后期的应用中被不断地改进[5-13]，提高了计算精度同时降低了不确定性[14]。随着高频地下水水位监测技术的应用，该方法已成为干旱半干旱区定量研究植被覆盖区潜水蒸发的常用方法[15-18]。

巴丹吉林沙漠湖泊的形成机制及其水分补给来源是该区域研究的热点问题之一[19-23]。蒸散发是沙漠湖区水分排泄的唯一途径，准确计算该值是水量平衡研究的重点。在以往研究中，多认为湖滨区的潜水蒸发量相较于水面蒸发量可忽略不计，少数考虑了潜水蒸发，但由于缺少实测资料，可能会导致结果产生误差。随着沙漠腹地实测资料的积累以及对更精确水量平衡计算的需求，全面考虑巴丹吉林沙漠腹地湖盆蒸发的特殊性，进一步精细计算湖滨区潜水蒸发量并探讨其所占湖区水分支出的比重，对研究沙漠腹地湖区水量平衡有着重要意义。

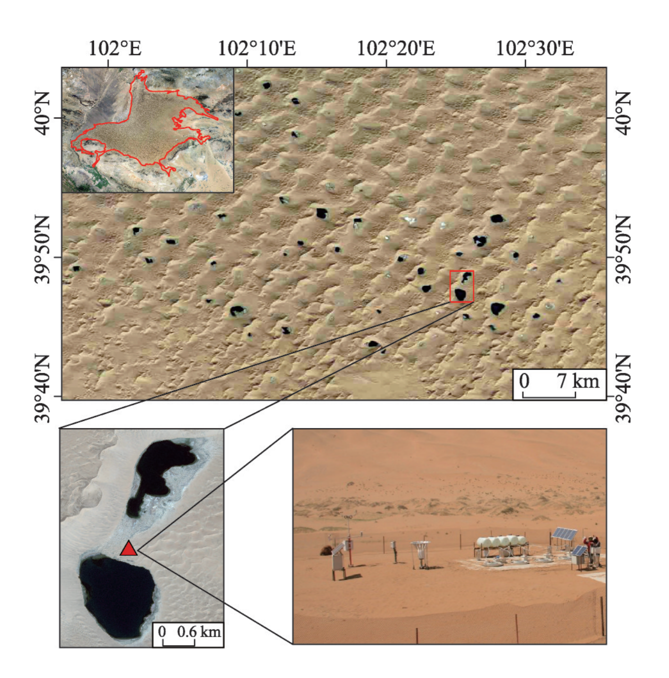
准确评估巴丹吉林沙漠腹地湖区潜水蒸发对地下水排泄的贡献率，需要获得精确的潜水、水面蒸发强度及各区的面积。本文以苏木吉林湖区为代表，在现有野外观测条件下，将潜水蒸发分为植被覆盖区和裸地分别计算。基于2012年以来积累的沙漠水面蒸发强度研究结果，确定研究区水面蒸发量范围。同时结合高分辨率的谷歌影像、DEM（Digital Elevation Model）和野外实测地下水埋深数据，进行精细化目视解译，获得水面、主要类型植被覆盖区以及各等级地下水埋深区面积，旨在为苏木吉林湖区地下水均衡计算提供更为精确的基础资料，同时为巴丹吉林沙漠水量平衡研究提供更加准确的蒸散发值。

1 研究区概况

巴丹吉林沙漠位于内蒙古西部阿拉善高原，面

收稿日期：2019-12-23； **修订日期：**2020-03-26
基金项目：国家自然科学基金重点项目（41530745）资助
作者简介：张文佳（1994-），女，硕士研究生，研究方向为气候变化与水循环. E-mail: wjzhang2017@lzu.edu.cn
通讯作者：王乃昂. E-mail: wangna@lzu.edu.cn

积约5.22×10⁴ km²[24]。该区属大陆性气候，夏季平均气温为25.3 ℃，冬季平均气温为-9.1 ℃，多年平均降水量100 mm左右，且年际变率较大，年内降水主要集中在5—9月[25-26]。沙漠内共有常年积水湖泊110个，多为面积小于1 km²的地下水补给型湖泊[27]。区内湖泊的TDS(total dissolved solids)差异显著[28]，多为封闭型湖盆，植被景观呈同心圆环状分异的特征。本文的观测研究对象是位于巴丹吉林沙漠东南部湖泊群的苏木吉林湖区的2个盐水湖(图1)。



注：底图是屏幕截取的谷歌地球影像v7.3.2.5776, https://www.google.com/earth/, 源数据由Landsat/Copernicus Image DigitalGlobe提供。

图1 研究区及气象观测站位置示意图

Fig. 1 The location of study area and meteorological station

2 数据与方法

2.1 地下水、气象观测数据及遥感影像数据

在巴丹吉林沙漠腹地多处布设了地下水观测点，使用Solinst 3001型水位计记录每小时的地下水水位。苏木吉林湖区主要涉及的植被类型有滨湖生长的芦苇、芨芨草、白刺，少量分布其他类型，根据野外植被调查情况及地下水监测试验数据，确定采用2013年和2014年生长期(5—11月)以芦苇和芨芨草-白刺为主要类型的观测点所观测的地下水数据，分析该湖区植被生长期潜水蒸发的耗散量。气象站设立在苏木吉林湖区的丘间地，观测基本气象要素和太阳辐射。文中使用19级别的谷歌影像提取各区范围，空间分辨率0.23 m，数据由©2019 CNES/Airbus Image DigitalGlobe提供。同时，使用SF-2040高精度GPS数据校准ASTER GDEM的高程数据，用于不同等级地下水埋深区的提取，其中SF-2040的水平测量精度在15 cm以内，垂直测量精度在10 cm以内。

2.2 潜水蒸发量估算方法

在植被覆盖的浅层地下水埋深区，通常可监测到地下水呈规律性的昼夜波动现象，White[4]提出了基于该动态变化资料估算潜水蒸发量的方法：

$$ET_g = S_y(24r \pm s) \tag{1}$$

式中：r是每日凌晨0:00—4:00的地下水补给速率；s是一日内地下水水位的变化量；S_y是含水层的给水度。本文使用Loheide改进后的地下水动态信息法对地下水依赖型植被覆盖区的潜水蒸发量进行估算[5]。通过对野外采集的土壤进行水分特征曲线测定，获得the van Genuchten模型中的参数，进而计算含水层给水度[17]。在降水时期，地下水动态信息法估算误差较大，使用Mazur等[10]研究中的提出的插补方法获得完整生长期的潜水蒸发量。

在沙漠腹地的湖盆中，由于湖水TDS较高，高水位时期水面扩大，将大量可溶性盐带到滨湖带，夏秋季湖泊水位下降，滨湖带地面裸露，地下水埋深虽然较浅，但由于盐析出留在土壤中，几乎没有植被生长。在这样的裸露地面，地下水动态信息法无法用于计算潜水蒸发量，本文使用雷志栋等[3]提出的计算潜水蒸发的经验模型清华公式进行计算：

$$E = E_{max}(1 - e^{-\eta E_0/E_{max}}) \tag{2}$$

式中：η为经验参数，与土壤质地及潜水埋深有关；E_{max}为一定潜水埋深下的极限蒸发强度，与土壤质地有关；E_0为大气蒸发能力，该公式能较好的模拟野外实测资料，被广泛应用于潜水蒸发计算。公式中的潜在蒸发E_0即大气蒸发能力，通常使用饱和水面蒸发量表示，本文基于沙漠腹地湖面上的自动气象站观测数据通过彭曼模型进行计算[29]；η和E_{max}参数根据野外采集的土壤样品质地测定及其对应的经验公式计算获得[30]。

3 结果分析与讨论

3.1 苏木吉林湖区潜水的蒸发量

由于巴丹吉林沙漠的“暖岛效应”[28]，腹地植被

的生长期与沙漠外围植被不一致，基于地下水的动态监测判断该区植被生长期大致为5月初至10月末。根据地下水动态信息法计算不同植被覆盖观测点的潜水蒸发量，其生长期每日潜水蒸发量变化如图2所示。芦苇观测点的潜水蒸发量变化与芨芨草-白刺观测点有着明显的差异，前者的潜水日蒸发量在生长期中期达到峰值，而后者在生长期前期即达到最高水平。在地下水依赖型植被生长区，潜水蒸发量的差异主要受控于植被类型[17]，解释了相同大气蒸发强度下，两类观测点生长期日潜水蒸发量变化趋势的差异，表明沙漠湖盆内不同类型植被在极端干旱条件下的基本生存策略不同。另外，从季节尺度上可看出，潜水的蒸发量与气象要素如太阳辐射、气温等具有密切的关系。如2013年生长期平均气温略高于2014年，可看出2个观测点的潜水蒸发量均是2013年生长期较高（芦苇观测点2013年、2014年生长期潜水蒸发强度分别为897.17 mm和812.65 mm；芨芨草-白刺观测点2013年、2014年生长期潜水蒸发强度分别为580.77 mm和541.72 mm）。

在湖区内无植被覆盖的区域，使用经验模型计算裸地的潜水蒸发量。以往研究通过潜水蒸发强度计算值与实测值进行对比研究，表明雷志栋等[3]提出的清华公式在干旱区具有较为广泛的通用性。该方法建立了潜水蒸发与潜在蒸发、潜水埋深之间的关系，本文使用基于彭曼模型计算的水面蒸发量来反映潜在蒸发。对土壤样品进行粒度分级，确定浅层地下水埋深的土壤质地为中细砂，其潜水蒸发临界深度约为3 m。苏木吉林湖区生长期与非生长期裸地潜水蒸发计算结果如表1所示，随着地下水埋深的增大，裸地潜水蒸发强度非线性减小。地下水埋深0.25 m时，其蒸发强度接近潜在蒸发，地下水埋深大于1.5 m时，生长期的潜水蒸发强度已下降至100 mm以内，且地下水埋深大于2.5 m时，蒸发强度趋于0。生长期（5—10月）比非生长期的裸地潜水蒸发量高，主要是由于2个时期大气蒸发力的较大差异。

3.2 潜水蒸发所占湖区水分耗散的比重

根据高分辨率的影像获得苏木吉林湖区主要类型植被区分布图，并根据校正后的DEM资料绘出不同等级地下水埋深区分布图（图3）。生长期和非生长期植被覆盖区的潜水蒸发估算方法不同，需分别统计2个时期不同类型潜水蒸发的区域面积，并基于已计算的各区潜水蒸发强度，统计2013年苏木吉林湖区植被覆盖区及裸地的潜水蒸发总量（表2）。

湖泊水面蒸发是沙漠腹地湖区水分支出计算的重要内容，由于估算方法或数据资料不同，前人所估算结果存在较大的差异。早期由于缺少实测资

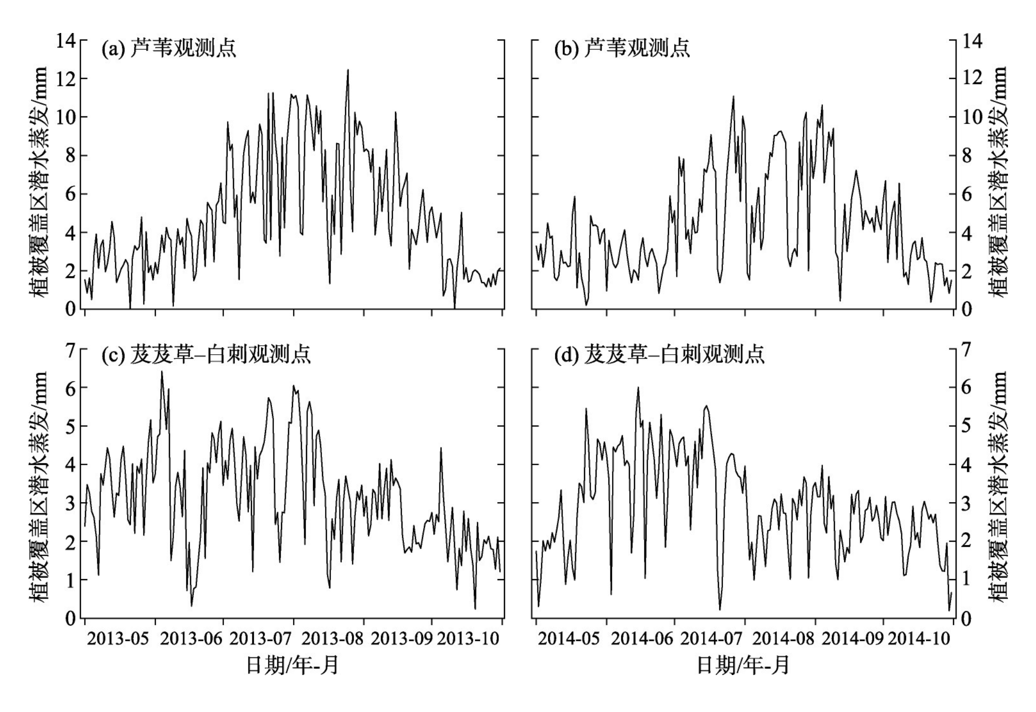


图2 苏木吉林湖区植被覆盖区观测点潜水蒸发量

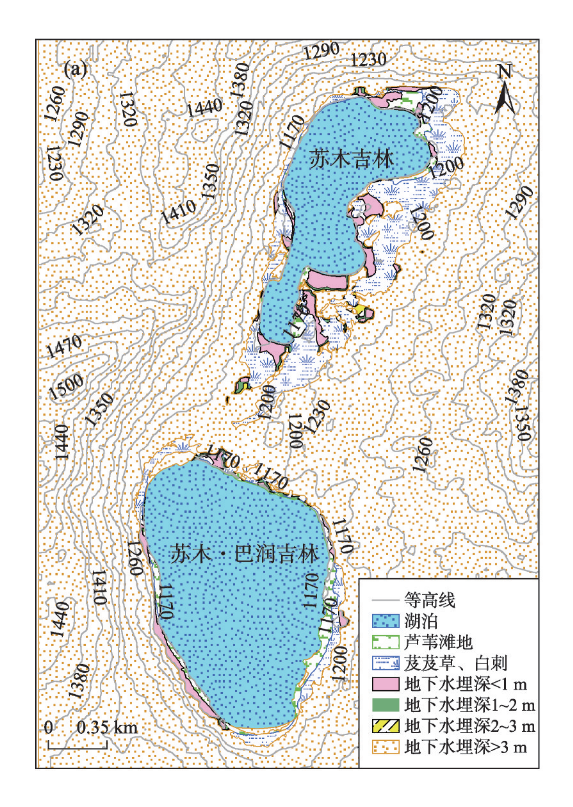
Fig. 2 Groundwater evapotranspiration at vegetation covered observation areas of Sumujilin Lake Area

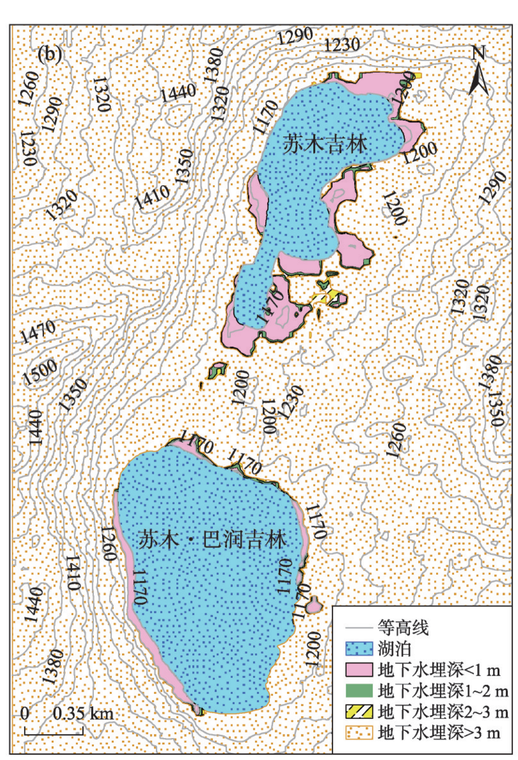
表1 苏木吉林湖区裸地潜水蒸发量统计及清华公式参数

Tab. 1 Statistics of groundwater evapotranspiration from bare land and Qinghua formula parameters of Sumujilin Lake Area

地下水埋深/m	2013年裸地潜水蒸发/mm				2014年裸地潜水蒸发/mm				η	E_{max}
	生长期		非生长期		生长期		非生长期			
	总量	日均值	总量	日均值	总量	日均值	总量	日均值		
0	1055.39	5.74	425.38	2.35	930.86	5.06	325.24	1.80	1.204	18.752
0.25	1001.99	5.45	439.01	2.43	906.28	4.93	346.89	1.92	1.184	17.636
0.5	718.67	3.91	330.98	1.83	659.21	3.58	266.39	1.47	0.970	8.704
0.75	464.24	2.52	232.16	1.28	434.99	2.36	192.23	1.06	0.783	4.040
1	271.18	1.47	152.18	0.84	260.56	1.42	130.55	0.72	0.631	1.875
1.25	143.71	0.78	92.62	0.51	141.12	0.77	82.38	0.46	0.510	0.871
1.5	71.03	0.39	52.64	0.29	70.63	0.38	48.24	0.27	0.411	0.404
1.75	33.96	0.18	28.39	0.16	33.95	0.18	26.66	0.15	0.332	0.188
2	82.9	0.45	14.48	0.08	15.91	0.09	13.93	0.08	0.268	0.087
2.5	3.49	0.02	3.41	0.02	3.49	0.02	3.38	0.02	0.174	0.018

注:地下水埋深为0 m时表示大气蒸发能力。





注:源数据由©2019 CNES/Airbus Image DigitalGlobe提供。

图3 苏木吉林湖区生长期(a)与非生长期(b)不同类型植被分布及各级地下水埋深区分布

Fig. 3 Vegetation coverage and groundwater depth gradient of Sumujilin Lake Area in the growing season(a) and non-growing season(b)

料,所计算的结果多为淡水蒸发量,估值多偏高[20]。随着实地监测研究的开展,含盐水体蒸发的盐度效应被考虑到计算中。在苏木吉林湖区,基于湖面蒸发皿观测的蒸发量在1200~1550 mm·a^{-1}范围内,其中2013年蒸发量为1314 mm[31-32]。音德尔图湖面的涡动观测显示:年蒸发量约为1450±10 mm[33]。音德尔图水体的TDS为175 g·L^{-1},苏木吉林和苏木·巴润吉林水体年均TDS分别为136 g·L^{-1}和124 g·L^{-1},3个湖泊水面水体盐度类似,其水面蒸发量应相差不多[28]。因此,以1300~1550 mm·a^{-1}作为苏木吉林湖区水面蒸发强度进行该湖区潜水蒸发量贡献率的讨论。

表2 2013年苏木吉林湖区各土地类型潜水蒸发强度及总量

Tab. 2 Groundwater evapotranspiration intensity and total amount of various land types in Sumujilin Lake Area in 2013

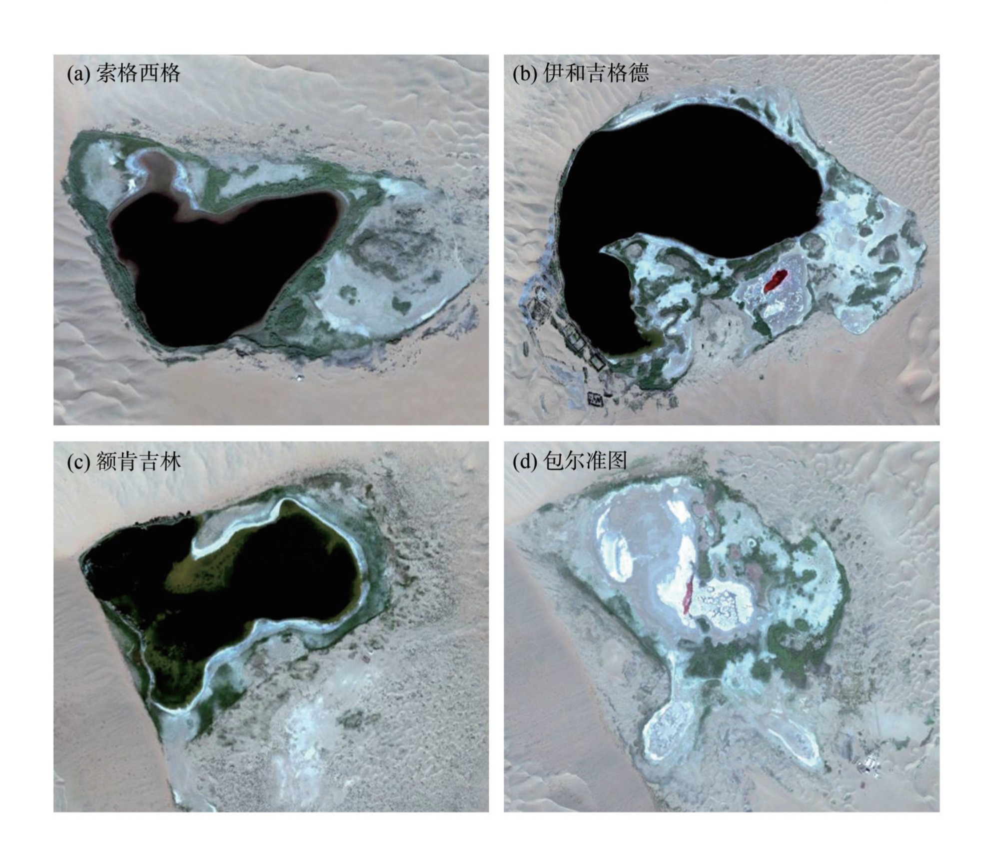
湖区蒸发类型	水面蒸发	植被覆盖区潜水蒸发		裸地潜水蒸发		
	湖泊	芦苇覆盖区	芨芨草、白刺覆盖区	地下水埋深<1 m	地下水埋深1~2 m	地下水埋深2~2.5 m
生长期蒸发强度/mm	1450~1550	897.17	580.77	728.30	129.97	9.68
生长期面积/m²	1.91×10^6	1.45×10^5	6.41×10^5	1.58×10^5	2.62×10^4	2.99×10^4
非生长期蒸发强度/mm	1450~1550	–	–	334.05	81.46	8.94
非生长期面积/m²	1.90×10^6	–	–	3.84×10^5	5.50×10^4	6.28×10^4
蒸发总量/m³	5.03×10^6~5.53×10^6	1.30×10^5	3.72×10^5	2.43×10^5	7.88×10^3	8.50×10^2

注:–表示地下水动态信息法计算时无此项数据。

通过计算得到:2013年苏木吉林湖区潜水蒸发量约占湖区地下水排泄总量的11.32%~13.21%,占有相当的比重。从湖区的单个湖盆看,苏木吉林湖盆潜水蒸发对湖盆水分排泄的贡献要大于苏木巴润吉林。巴丹吉林沙漠腹地有较多湖泊类似于苏木吉林,湖盆内生长期植被覆盖面积大,且地下水埋深较浅的区域面积也相对较大,如伊和吉格德、索格西格、额肯吉林、包尔准图等(图4)。近期有研究[31]表明:在沙漠腹地东南部以数值模拟的方法,对比了非湖泊区域的潜水蒸发总量与湖面的总蒸发量,前者比后者大1.6倍。由于该研究涉及的区域面积较大,其中包括15个湖盆,采用200 m分辨率的高程与地下水数据进行模拟,沙漠腹地湖泊面积多小于1 km²,在该分辨率下进行计算可能会存在一些误差。此外,该研究所包括的15个湖盆与本研究的湖区在植被覆盖及地下水埋深条件等方面不同,因此,所计算的潜水蒸发对湖盆地下水支出总量的贡献量级与本研究存在差异。但该研究同样认同在讨论巴丹吉林沙漠腹地湖区水量平衡时,潜水蒸发量是不可忽略的重要内容。

3.3 植被对湖区地下水排泄的贡献及其估算方法

为讨论植被对苏木吉林湖区地下水排泄的贡



注:图片是屏幕截取的谷歌地球影像v7.3.2.5776, https://www.google.com/earth/, 源数据由©2019 CNES/Airbus Image DigitalGlobe提供。

图4 巴丹吉林沙漠腹地较典型湖盆的植被分布情况

Fig. 4 Vegetation distribution in typical lake basins in the hinterland of Badain Jaran Desert

献，对比一年内有植被生长的湖区潜水蒸发量与无植被生长假设情况下的潜水蒸发量。2013年和2014年，苏木吉林湖区潜水蒸发总量分别为7.54×10^5 m^{3}和6.81×10^5 m^3。在无植被生长的情况下，2013年和2014年潜水蒸发强度为1292.40 mm和1152.21 mm，地下水埋深在蒸发极限深度以内的裸地面积约5.01×10^5 m^2，估算得到2013年、2014年该湖区潜水蒸发总量为6.48×10^5 m^{3}和5.78×10^5 m^3。对比发现，有植被覆盖的苏木吉林湖区潜水蒸发比无植被覆盖的多16%~18%的地下水排泄量。所以，估算湖区潜水蒸发量时需特别考虑植被覆盖区潜水蒸发量，不能与裸地区域一概而论。

在极端干旱的沙漠腹地，地下水的昼夜波动现象是湖盆内植被利用地下水的直接证据，表明使用地下水动态信息法估算该区域潜水蒸发量是可靠的。不同类型植被及植被在生长期的各个阶段，其用水策略均是不同的，要计算植被生长期较为精确的耗水量，多数方法均需要考虑这些因素。而地下水动态信息法只需要野外地下水水位变化和含水层给水度，观测方法简单，且该方法所计算的结果可以代表周围较大面积范围内的平均潜水蒸发速率[14]。在野外观测条件较差的沙漠腹地，使用该方法进行植被地下水排泄量的观测与计算不失为一种低成本高效率的研究方法。

地下水动态信息法的应用是基于4条基本假设之上[5]，包括地下水水位的昼夜变化由植被耗水引起，植被在夜间蒸腾量可忽略不计，夜间地下水补给速率可代表当日地下水补给速率，以及含水层给水度的准确性。自该方法被提出后，被不断地验证和改进，其中主要集中在地下水补给速率和给水度确定2个方面。在地下水补给速率的条件和计算方法上，Loheide[13]和Gribovszki[11]等分别提出不同的改进方法，均提高了计算的准确度。以求得既有代表性又可靠的含水层给水度，很多学者基于各自的研究条件提出了不同的方法。Gribovszki[11]对以往主要的给水度确定方法进行对比分析，认为抽水试验方法是成本相对低且耗时少的方法，但对于沙漠腹地条件，进行抽水所需的仪器装置等难以携带至野外，因此，在该区域进行土壤湿度观测或采集原状土样进行模拟确定的方法是较为可行的。由于在巴丹吉林沙漠靠近湖泊生长的植被的区域，一般为沼泽化草地，地下水观测仪器难以布设，所以，文中将该部分区域划入到了芦苇为主要类型的植被覆盖区，可能会对植被覆盖区潜水蒸发总量的计算产生影响。因此，要准确估算巴丹吉林沙漠的地下水排泄总量，需要对这方面进一步加以补充完善。

4 结 论

基于2种不同类型植被覆盖区的地下水长期观测资料，应用地下水动态信息法探讨沙漠腹地湖盆植被对地下水排泄的贡献率，进而加入裸地潜水蒸发确定潜水蒸发对苏木吉林湖区水量平衡的影响量级，得到如下结论：

（1）在极端干旱的沙漠腹地湖盆中，地下水动态信息法适用于计算植被覆盖区的潜水蒸发量，苏木吉林湖区芦苇观测点潜水蒸发量明显大于芨芨草-白刺观测点，且2类植被覆盖区在生长期不同阶段水分耗散规律具有差异性。

（2）苏木吉林湖区的潜水蒸发总量占湖区地下水排泄总量的11.32%~13.21%。推及沙漠腹地其他湖泊可证明巴丹吉林沙漠腹地湖盆潜水蒸发量是沙漠水量平衡计算中不可忽略的一部分。

（3）同等大气蒸发条件下，生长期有植被覆盖的苏木吉林湖区潜水蒸发总量比无植被覆盖条件下多16%~18%的地下水排泄量。仅使用裸地潜水蒸发计算的经验模型探讨沙漠腹地湖盆的地下水均衡会产生较大误差。

参考文献（References）：

[1] 李晓媛，于德永．蒸散发估算方法及其驱动力研究进展[J]．干旱区研究，2020, 37(1): 26−36. [Li Xiaoyuan, Yu Deyong. Progress on evapotranspiration estimation methods and driving forcesin arid and semiarid regions [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 26−36.]

[2] 叶水庭，施鑫源，苗晓芳．用潜水蒸发经验公式计算给水度问题的分析[J]．水文地质工程地质，1982, 4(12): 45−48. [Ye Shuiting, Shi Xinyuan, Miao Xiaofang. Analysis of calculating water supply with submerged evaporation empirical formula[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1982, 4(12): 45−48.]

[3] 雷志栋，杨诗秀，谢森传．潜水稳定蒸发的分析与经验公式[J]．水利学报，1984, 8(7): 60−64. [Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xie Senchuan. Analysis and empirical formula of stable evaporation in groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 8(7): 60−64.]

[4] White W N. A Method of Estimating Ground- Water Supplies Based on Discharge by Plants and Evaporation from Soil: Results of Investigations in Escalante Valley, Utah[M]. Washington: U. S.

Government Printing Office, 1932: 1-105.

[5] Loheide S P. A method for estimating subdaily evapotranspiration of shallow groundwater using diurnal water table fluctuations[J]. Ecohydrology, 2008, 1(1): 59-66.

[6] Gribovszki Z, Kalicz P, Szilágyi J, et al. Riparian zone evapotranspiration estimation from diurnal groundwater level fluctuations[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(1): 6-17.

[7] 李洪波, 侯光才, 尹立河, 等. 基于改进White方法的地下水蒸散发研究[J]. 地质通报, 2012, 31(6): 989-993. [Li Hongbo, Hou Guangcai, Yin Lihe, et al. Using the improved White method to quantify groundwater evapotranspiration[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(6): 989-993.]

[8] Yin L H, Zhou Y X, Ge S M, et al. Comparison and modification of methods for estimating evapotranspiration using diurnal groundwater level fluctuations in arid and semiarid regions[J]. Journal of Hydrology, 2013, 496: 9-16.

[9] 贾伍慧, 尹立河, 王晓勇, 等. 利用改进的Loheide方法计算地下水的蒸散发量[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 48-51. [Jia Wuhui, Yin Lihe, Wang Xiaoyong, et al. Quantifying groundwater evapotranspiration by themodified loheide method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 48-51.]

[10] Mazur M L C, Wiley M J, Wilcox D A. Estimating evapotranspiration and groundwater flow from water-table fluctuations for a general wetland scenario[J]. Ecohydrology, 2014, 7(2): 378-390.

[11] Gribovszki Z. Comparison of specific-yield estimates for calculating evapotranspiration from diurnal groundwater-level fluctuations [J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(3): 869-880.

[12] Nachabe M H. Analytical expressions for transient specific yield and shallow water table drainage[J]. Water Resources Research, 2002, 38(10): 1-7.

[13] Loheide S P, Butler J J, Gorelick S M. Estimation of groundwater consumption by phreatophytes using diurnal water table fluctuations: A saturated-unsaturated flow assessment[J]. Water Resources Research, 2005, 41(7): W07030.

[14] 王平, 张学静, 王田野, 等. 估算干旱区地下水依赖型植物蒸散发的White法评述[J]. 地理科学进展, 2018, 37(9): 1159-1170. [Wang Ping, Zhang Xuejing, Wang Tianye, et al. A review of the White method for the estimation of evapotranspiration fromphreatophytes in arid areas[J]. Progress in Geography, 2018, 37(9): 1159-1170.]

[15] Yuan G F, Luo Y, Shao M A, et al. Evapotranspiration and its main controlling mechanism over the desert riparian forests in the lower Tarim River Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(6): 1032-1042.

[16] Cheng D H, Li Y, Chen X H, et al. Estimation of groundwater evapotranspiration using diurnal water table fluctuations in the Mu Us Desert, Northern China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 490: 106-113.

[17] Yue W F, Wang T J, Franz T E, et al. Spatiotemporal patterns of water table fluctuations and evapotranspiration induced by riparian vegetation in a semiarid area[J]. Water Resources Research, 2016, 52(3): 1948-1960.

[18] 孙海涛, 陈亚鹏, 陈亚宁, 等. 塔里木河下游荒漠河岸林地下水蒸散发[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 116-125. [Sun Haitao, Chen Yapeng, Chen Yaning, et al. Groundwater evapotranspiration in desert riparian forest in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 116-125.]

[19] 王涛. 巴丹吉林沙漠形成演变的若干问题[J]. 中国沙漠, 1990, 10(1): 32-43. [Wang Tao. Formation and evolution of Badain Jaran Desert, China[J]. Journal of Desert Resert, 1990, 10(1): 32-43.]

[20] Chen J S, Li L, Wang J Y, et al. Water resources: Groundwater maintains dune landscape[J]. Nature, 2004, 432(7016): 459-460.

[21] 丁宏伟, 王贵玲. 巴丹吉林沙漠湖泊形成的机理分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1): 1-7. [Ding Hongwei, Wang Guiling. Study on the formation mechanism of the lakes in the Badain Jaran Desert [J]. Arid Zone Research, 2007, 24(1): 1-7.]

[22] 张竞, 王旭升, 胡晓农, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊水分补给机制的模拟——以苏木吉林湖区为例[J]. 湖泊科学, 2017, 29(2): 467-479. [Zhang Jing, Wang Xusheng, Hu Xiaonong, et al. Research on the recharge of the lakes in the Badain Jaran Desert: Simulation study inthe Sumu Jaran lakes area[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(2): 467-479.]

[23] 韩鹏飞, 王旭升, 胡晓农, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊水面蒸发与气象要素的动态关系[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1012-1020. [Han Pengfei, Wang Xusheng, Hu Xiaonong, et al. Dynamic relationship between lake surface evaporation and meteorological factors in the Badain Jaran Desert [J]. Arid Zone Research, 2018, 35 (5): 1012-1020.]

[24] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1087-1094. [Zhu Jinfeng, Wang Nai'ang, Chen Hongbao, et al. Study on the boundary and the area of Badain Jaran Desert based on remote sensing imagery[J]. Progress in Geography, 2010, 29(9): 1087-1094.]

[25] 马宁, 王乃昂, 李卓仑, 等. 1960—2009年巴丹吉林沙漠南北缘气候变化分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 242-250. [Ma Ning, Wang Nai'ang, Li Zhuolun, et al. Analysis on climate change in the northern and southern marginal zones of the Badain Juran Desert during the period 1960-2009[J]. Arid Zone Research, 2011, 28 (2): 242-250.]

[26] 王乃昂, 马宁, 陈红宝, 等. 巴丹吉林沙漠腹地降水特征的初步分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 153-160. [Wang Nai'ang, Ma Ning, Chen Hongbao, et al. A preliminary study of precipitation characteristicsin the hinterland of Badain Jaran Desert[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 153-160.]

[27] Wang N A, Ning K, Li Z L, et al. Holocene high lake-levels and pan-lake period on Badain Jaran Desert[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(8): 1633-1641.

[28] 马宁, 王乃昂. 巴丹吉林沙漠腹地湖泊水面蒸发模拟的特殊性[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1141-1149. [Ma Ning, Wang Nai'ang. On the simulation of evaporation from lake surface in the hin-

terlandof the Badain Jaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(6): 1141-1149.]

[29] Penman H L, Keen B A. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1948, 193(1032): 120-145.

[30] 付秋萍. 旱区潜水蒸发特征与排水系统参数确定方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. [Fu Qiuping. Study on Phreatic Evaporation Characteristics and the Parmeter Determination Method of Drainage System Arid Zone[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.]

[31] 周燕怡, 王旭升. 巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 44-54. [Zhou Yanyi, Wang Xusheng. Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 44-54.]

[32] 王旭升, 胡晓农, 金晓媚, 等. 巴丹吉林沙漠地下水与湖泊的相互作用[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 91-99. [Wang Xusheng, Hu Xiaonong, Jin Xiaomei, et al. Interactions between groundwater and lakes in Badain Jaran Desert[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 91-99.]

[33] 胡文峰, 王乃昂, 赵力强, 等. 巴丹吉林沙漠典型湖泊湖气界面水一热交换特征[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 1061-1071. [Hu Wenfeng, Wang Nai'ang, Zhao Liqiang, et al. Water-heat exchange over a typical lake in Badain Jaran Desert, China[J]. Progress in Geography, 2015, 34(8): 1061-1071.]

Magnitude of groundwater evapotranspiration in the Badain Jaran Desert based on groundwater dynamics method and empirical model: A case study of the Sumujilin Lake Area

ZHANG Wen-jia, WANG Nai-ang, YU Xin-ran, NIN Zhen-min, ZHAO Li-qiang

(*College of Earth and Environmental Sciences, Center for Glacier and Desert Research, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*)

Abstract: The Sumujilin Lake Area was taken as a study case to determine the contribution of evapotranspiration to groundwater drainage in the Badain Jaran Desert hinterland. Using high-resolution remote sensing image, digital elevation model (DEM), and field-measured groundwater depth, we extracted the ranges of lake water surface, different types of vegetation coverage areas, and groundwater depth hierarchic areas in the study area. Meanwhile, the evapotranspiration of vegetation coverage area and bare land wererespectively calculated on the basis of the groundwater dynamic method and the groundwater evapotranspiration empirical model. The results showed that the evapotranspiration from the *Phragmites australis* observation area is larger than that from the *Nitraria tangutorum*-*Achnatherum splendens* observation area during the same period. There are differences in the evapotranspiration patterns of the two types of observation areas. The former reaches the peak of the evapotranspiration rate during the middle stage of the growing season, whereas the latter reaches the peak during the earlystage. Under the same atmospheric conditions, the total amount of groundwater evapotranspiration with vegetation cover in the Sumujilin Lake Area during the growing season is 16% to 18% more than that without vegetation coverage. Therefore, using only bare land groundwater evapotranspiration formulas or models to calculate the groundwater balance of the lake basin would produce large errors. Finally, the total amount of groundwater evapotranspiration in the Sumujilin Lake Area, including vegetation coverage and bare zone with shallow groundwater depth, accounts for 11.3% to 13.2% of the total groundwater drainage in the lake area, which proves that groundwater evapotranspiration is one of the key items of the water cycle of Badain Jaran Desert lakes and could not be negligible in the water balance studies.

Keywords: groundwater evapotranspiration; extinction depth; riparian vegetation; groundwater dynamic method; groundwater drainage; Badain Jaran Desert